

Une reconstruction historique du concept de pression atmosphérique

Cécile de Hosson¹

Dans cette annexe, nous présentons une reconstruction historique du concept de pression, et plus spécifiquement de celui de pression atmosphérique. Celle-ci s'appuie pour l'essentiel sur des écrits originaux (textes de première main dans leur traduction française pour autant qu'elles soient disponibles) et privilégie une approche internaliste. Nous plaçons notre démarche sous l'autorité de Koyré en visant une histoire des idées comme moyen d'accéder à notre propre « autobiographie intellectuelle » (Koyré 1966, p. 399). Il s'agit d'un travail d'exploration et de tri sous-tendu par un projet didactique spécifique : l'élaboration d'un matériau d'enseignement. Par voie de conséquence, la synthèse qui suit n'est ni objective et encore moins exhaustive, mais apparaît, comme tout projet de reconstruction, contrainte :

Les reconstructions historiques [sont] toujours incertaines (...). De plus, elles sont toujours partielles. L'historien ne raconte pas tout ce qu'il sait ou pourrait savoir mais ce qui est important (...). L'histoire de l'historien est donc l'effet d'un choix (Koyré 1966, p. 391).

Toutefois, nous nous préserverons au mieux des abus d'interprétation qu'une lecture non-experte pourrait engendrer en appuyant nos lectures sur quelques exégèses philosophiques et historiques faisant autorité². Notons également que les relations, les échanges entre les personnes ne seront pas étudiés ni relatés ici.

L'*horror vacui* comme cause de l'élévation de l'eau dans les pompes aspirantes

La création du concept de pression et plus spécifiquement celui de pression atmosphérique est indissociable de l'histoire des pompes aspirantes et de la genèse de l'idée de vide. En effet, l'hypothèse de la pression atmosphérique dans son acception restrictive de « poids de l'air » naît au milieu du 17^e siècle de la tentative de résoudre un problème qui, jusqu'alors pouvait être considéré comme technique : celui de la limite d'élévation de l'eau par l'utilisation des pompes aspirantes³.

Les premières pompes aspirantes dont on ait une trace claire sont décrites par Héron d'Alexandrie (1^e siècle après J.C.) dans *Les Pneumatiques*⁴. Il s'agit de pompes à incendie qui fonctionnent de la façon suivante : un bras de levier $\alpha\pi$ entretient un mouvement de va-et-vient de deux pistons X et K à l'intérieur de deux cylindres A et E. A chaque élévation de l'un des pistons, une soupape τ s'ouvre, laissant monter l'eau à l'intérieur du cylindre dans lequel il se trouve. Simultanément, l'autre piston d'abaisse, la soupape situé à la base du cylindre contenant ce piston se ferme, l'eau est éjectée par l'ouverture H (Figure 1).

¹ Laboratoire de Didactique André Revuz (LDAR – EA 4344), Université Paris Diderot-Paris 7. cecile.dehosson@univ-paris-diderot.fr. Article non publié

² Sadoun Goupil (1963), Shappin & Schaeffer (1993), S. Roux (2005), A. Koyré (1966), C. Massignat (2006), Berthelot (2002).

³ Cette interdépendance de la technique de l'élévation de l'eau et des idées sur le vide nous amène à faire le choix d'une présentation conjointe de deux aspects techniques et scientifiques liés à l'histoire de la pression. Mis en perspective au sein de l'histoire du concept de pression, ce parti pris présente une certaine originalité. Il nous permettra cependant d'ouverture une palette de possibilités d'exploitations pédagogiques à différents niveaux scolaires.

⁴ Nous nous référons à l'édition à l'édition critique des *Pneumatiques* traduite par Albert de Rochas (1882), publiée chez Masson et disponible à <http://remacle.org/bloodwolf/erudits/heron/pneumatiques.htm>.

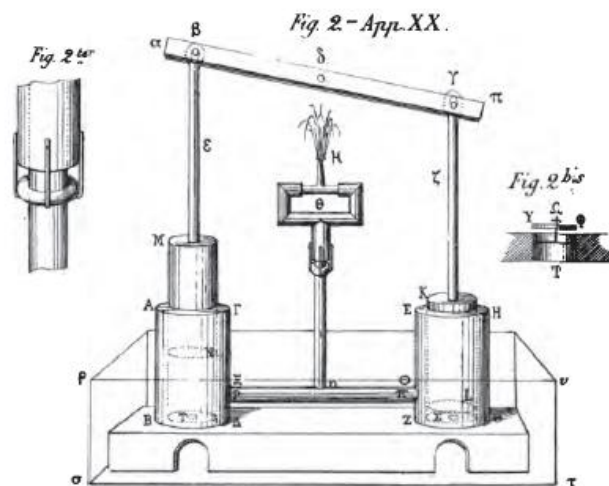


Figure 1 : « Pompe dont on se sert dans les incendies », Héron d'Alexandrie (1^e siècle apr. J.C.), *Les Pneumatiques*.

La cause de l'élévation de l'eau dans les cylindres est attribuée à ce que Héron d'Alexandrie nomme la « force du vide ». Selon lui, « le vide n'existe point naturellement d'une façon continue, mais se trouve réparti en particules ténues à travers l'air, l'eau, le feu, et les autres corps » (Héron, introduction des *Pneumatiques*). Et l'existence du vide de façon continue nécessite « l'intervention d'une certaine force » :

Ainsi, que l'on prenne un vase léger à ouverture étroite et qu'on l'applique contre les lèvres en aspirant l'air, ce qui le raréfie, le vase restera suspendu aux lèvres, car le vide attirera la chair dans le vase afin de remplir le vide. Il est donc clair que la portion de l'espace compris dans le vase était devenue vide en partie (Héron, *ibid.*).

Cette conception apparaît quelque peu distincte de celle d'Aristote pour qui le vide n'existe pas⁵, ni par lui-même et indépendamment des choses, ni dans les choses elles-mêmes, ni en tant que chose (Aristote, *Physique*, livre IV). La pensée scolastique médiévale reprendra à son compte la conception aristotélicienne du vide (*l'horror vacui*) et l'élévation de l'eau dans les pompes aspirantes sera posée comme une façon pour la nature d'agir pour éviter l'installation du vide sous le piston. Or, ce comportement de la nature semble « limité », pour l'eau, à une dizaine de mètres. En effet, depuis Héron d'Alexandrie, les pompes aspirantes permettent d'élever de l'eau jusqu'à une hauteur de 10 mètres. Au-delà, l'élévation cesse et un espace vide en apparence s'installe entre la surface de l'eau et le bas du piston. Jusqu'au 17^e siècle, ce problème sera considéré comme un problème technique lié au fonctionnement intrinsèque de la pompe, et des solutions (techniques) seront recherchées pour augmenter la hauteur d'élévation de l'eau. L'une des réussites la plus remarquable issue de cette recherche demeure sans doute la pompe aspirante-foulante d'al-Jazari (1136-1206), voir Figure 2.

⁵ Le mot « vide » est utilisé chez Aristote comme « espace privé de corps » (Aristote, *Physique*, livre IV, chap. 9).

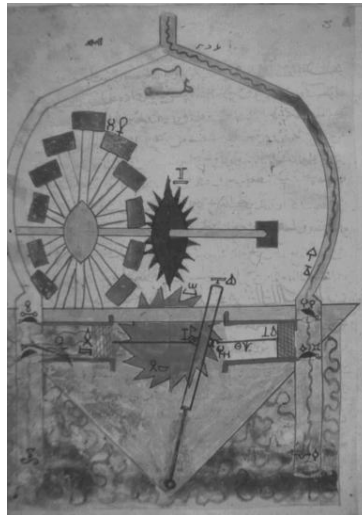
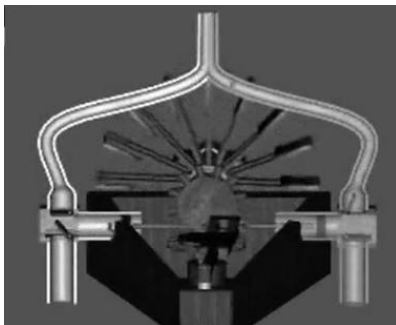
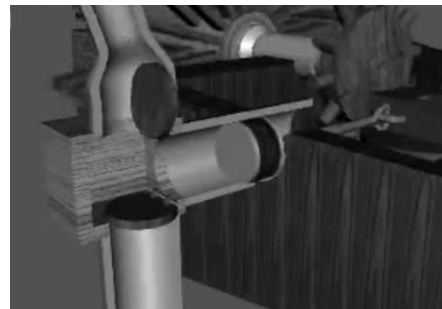


Figure 2 : La pompe d'al-Jazari (tiré du manuscrit Ahmet III 3472, Bibliothèque Topkapi, Istanbul)⁶.

Héritier des travaux Héron (il reprend les dessins des dispositifs des *Pneumatiques* dans son ouvrage consacré aux machines aspirantes), Abū al-'Iz Ibn Ismā'īl ibn al-Razāz al-Jazarī imagine une machine permettant d'aspirer puis de refouler l'eau d'une rivière en entretenant un mouvement de va-et-vient de deux pistons grâce à l'invention du premier système bielle-manivelle. La pompe d'al-Jazari est constituée de deux pompes, l'une aspirante, l'autre foulante qui agissent de manière alternative. Dans cette double pompe, une roue hydraulique fait tourner une roue dentée verticale qui à son tour entraîne une roue horizontale. Cette dernière provoque l'oscillation des deux pistons opposés. Les cylindres des pistons sont reliés à des tuyaux d'aspiration et de refoulement qui sont équipés de soupapes s'ouvrant uniquement vers le haut. L'eau monte par les tuyaux d'aspiration ; les tuyaux de refoulement se chargent ensuite de la décharger dans le système d'évacuation situé plusieurs mètres au dessus de l'installation (voir ci-dessous).



Le mouvement de va-et-vient des pistons à l'intérieur des deux cylindres horizontaux est obtenu par un système de bielle manivelle entraîné par une succession de roue dentée engrainées. La roue verticale est entraînée par le courant de l'eau qui est puisée pour être élevée.



Lorsque la bielle part vers l'arrière, la soupape du tuyau d'aspiration (en bas sur le dessin) s'ouvre, l'eau monte. Le mouvement vers l'avant de la bielle repousse l'eau, la soupape du bas se referme, celle du tuyau d'élévation s'ouvre et laisse passer l'eau.

La conception de cette pompe repose sur une prouesse essentiellement technique (notamment sur l'invention du système bielle-manivelle qui permet la transformation d'un mouvement de rotation en un mouvement de translation) mais n'est soutenue, à notre connaissance, d'aucun discours justifiant

⁶ On trouvera une animation du fonctionnement de la pompe d'al-Jazari sur le site du musée virtuel des technologies : <http://www.veoh.com/collection/HistoireTechnologie/watch/v299449kkx4Ztb7>

la raison pour laquelle l'eau s'élève lorsque le piston du cylindre horizontal se déplace vers la droite (ou vers la gauche selon que l'on s'intéresse au cylindre d'aspiration de droite ou de gauche).



Gravure extraite de G. Agricola, *De re metallica*, trad. de l'ed. originale latine de 1556 par A. France-Lanord, 1992, p. 152.

Le système mis au point par al-Jazari se généralise en Europe à partir de la Renaissance. L'amélioration des techniques conduit les ingénieurs du 16^e siècle à concevoir des paliers intermédiaires qui permettent d'obtenir une hauteur d'élévation de l'eau supérieure à 10 mètres. Cette hauteur correspond en fait à la somme des hauteurs d'eau à chaque palier, chacune prise individuellement ne pouvant évidemment pas dépasser 10 mètres. La pompe créée par Georgius Agricola en 1556 est à ce titre tout à fait exemplaire. Elle inspirera Renkin Sualem pour la réalisation en 1685 de la Machine de Marly qui alimentera en eau le Château de Versailles jusqu'en 1817 grâce à 64 pompes capables d'élever l'eau jusqu'à une hauteur de 160 mètres. Malgré tout, 10 mètres reste une limite infranchissable pour une aspiration par un unique piston dans un unique cylindre, et ce, quelle que soit la largeur du cylindre. Cet obstacle ayant été contourné par des voies de résolution techniques (les paliers intermédiaires), la cause de la limite d'élévation est demeurée soumise à l'autorité scolastique de l'*horror vacui* jusqu'au milieu du 17^e siècle.

Le problème de l'élévation de l'eau dans les pompes aspirantes devient un problème scientifique

En 1638 paraît le *Discours concernant les deux sciences nouvelles*, dans lequel Galilée reprend cette question de la limite de l'élévation de l'eau par aspiration :

Sagredo : Il m'arriva un jour d'observer une citerne à laquelle on avait adapté une pompe dans la conviction qu'on en pourrait tirer de l'eau à moindre peine ; l'eau montait par aspiration et non sous une poussée. Tant que l'eau atteignait un niveau déterminé dans la citerne, la pompe la tirait en abondance, mais elle cessait d'opérer en deçà d'une certaine hauteur. Je crus que l'appareil était détérioré, mais l'artisan que j'avais trouvé pour faire la réparation me dit qu'il n'y avait aucun défaut, sinon du côté de l'eau qui, étant trop basse, ne souffrait plus d'être élevée aussi haut. Et il ajouta qu'aucune pompe, qu'aucune machine agissant par aspiration n'avait le pouvoir de la faire monter d'un cheveu au-delà de dix-huit coudées, ce chiffre représentant la hauteur maximale, quelle que soit la largeur des pompes. (Galilée 1638, pp. 18-19).

A partir de ce récit Galilée va remettre en cause l'inexistence du vide. Cette remise en cause émerge dans le contexte de la création d'une science nouvelle, celle de la résistance des corps à la rupture. Pour Galilée, la limite d'élévation de l'eau par aspiration n'est pas à rechercher dans l'objet « pompe » lui-même mais dans la « résistance due au vide pour tous les cylindres pleins » :

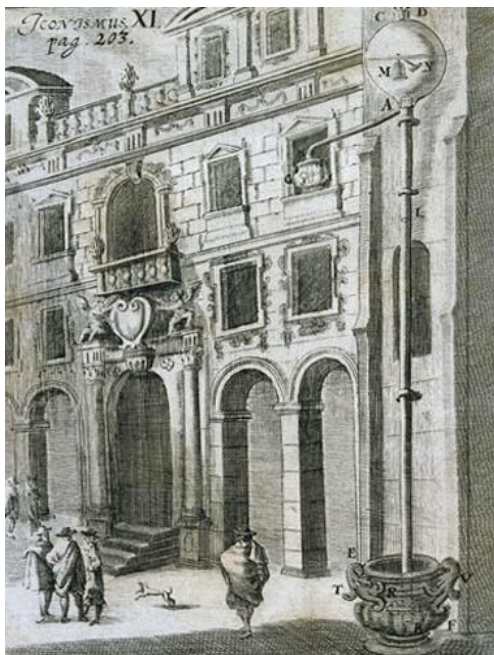
Sagredo : Ce qui est attiré dans la pompe, n'est-il pas, en somme, un cylindre d'eau qui, attaché par en haut, s'allonge de plus en plus, atteignant finalement ce point au-delà duquel, tiré par son propre poids devenu excessif, il se rompt exactement comme une corde ?

Salviati : C'est bien ainsi que les choses se passent ; et comme cette hauteur de dix-huit coudées fixe par avance la limite jusqu'à laquelle peut se maintenir une quantité d'eau quelconque (...) chaque fois où nous pèserons l'eau contenue dans un tube de dix-huit coudées (...) nous obtiendrons la valeur de la résistance due au vide pour tous les cylindres pleins. (Galilée 1638, p.19).

Galilée souscrit à l'idée qu'il y a bien un espace « vide de toute matière » au dessus du piston lorsque celui-ci atteint une hauteur supérieure à 10 mètres et explique la limite de la colonne d'eau par « la

résistance à la rupture due au vide » (*Ibid.*). En d'autres termes, le vide retient des colonnes de matière (eau, bois, métal, verre...) selon leur poids jusqu'à une certaine limite qui est celle de la rupture. Si l'explication proposée par Galilée n'est pas conforme à celle de la physique d'aujourd'hui, elle place la cause de la limite de l'aspiration de l'eau dans une propriété spécifique des colonnes de matière et non plus dans la technique même de l'aspiration (ou de la pompe aspirante). Ce déplacement va ouvrir la voie à une recherche scientifique des causes de la suspension limitée d'une colonne d'eau dans un cylindre à 10 mètres de hauteur, et relancer la polémique autour de l'existence du vide. D'une question initialement technique (celle de l'élévation de l'eau) on passe avec Galilée à un problème scientifique (celui de la cause de la limitation de cette élévation). Ce fait n'est pas rare dans l'histoire des idées. Ainsi, « avant de venir féconder les techniques, les sciences leur ont dû souvent le terrain de leur naissance » (Seris 1994, p. 219). Galilée identifie un échec technique en rapportant l'épisode des citerniers et l'intègre dans un schéma scientifique qui, selon Canguilhem appartient à une espèce fréquente en histoire des sciences : « celle d'un remaniement théorique procédant d'un échec technique ». (Canguilhem 1990, p. 282).

Quelques années avant la parution des *Discours*, dans une lettre datée de 1630, Jean-Baptiste Baliani interpelle Galilée et lui suggère de considérer la suspension de l'eau comme le résultat d'un équilibre avec le poids de l'air atmosphérique. Son raisonnement est sous-tendu par l'idée que l'air et l'eau ne diffère que par leur poids respectifs : « si l'air est pesant, il n'y a entre l'eau et l'air qu'une différence de plus ou moins » (Baliani 1630). Baliani, et Galilée à sa suite, transforment donc le problème technique de la limite d'aspiration des pompes en une question véritablement scientifique. Cette mutation va conduire les savants du début du 17^e siècle à former des colonnes de liquides afin de mettre à l'épreuve l'hypothèse du poids l'air. L'une des expériences les plus révélatrices de cette transformation demeure sans doute celle imaginée par Berti et Magiotti en 1641.



Expérience de Gasparo Berti et de Raffaello Magiotti réalisée en 1641 au convent des Minimes, Gaspar Schott, *Technica curiosa, sive, Mirabilia artis*, Würzburg 1664. Cette expérience sera reproduite dans les rues de Rouen par Blaise Pascal en 1646.

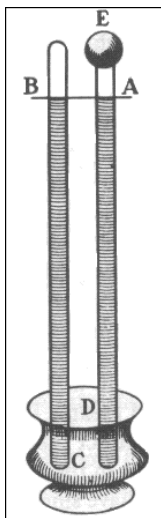
De l'eau est versée par l'ouverture G (située à la fenêtre) jusqu'à ce que le dispositif en soit entièrement rempli, le robinet R (au bas du tube plongé dans la cuve) étant fermé. On ouvre le robinet R, l'eau s'écoule dans la cuve et se stabilise à une hauteur environ égale à 10 mètre. Cette expérience incarne de façon remarquable le passage que nous évoquions précédemment d'une question initialement technique (la limite des pompes aspirantes) et une question scientifique. Ici, il n'est plus question de pompe, ni même d'aspiration. Le dispositif imaginé par Berti et Magiotti est un dispositif scientifique conçu pour éprouver l'hypothèse de Baliani concernant l'action de l'air extérieur. La colonne d'eau n'est pas créée par élévation (mouvement vertical ascendant, de bas en haut) pour des besoins humains mais créée par remplissage (mouvement vertical descendant, de haut en bas) pour les besoins de la science. Le caractère admirable de cette expérience, c'est que ces deux modes opératoires sont considérés par Berti et Magiotti comme strictement équivalents, ce qui est loin d'être une évidence.

Dans un cas, la colonne est formée par aspiration, dans l'autre, par déversement. Ce qui guide les savants, c'est l'hypothèse sous-jacente à la formation et à la hauteur de la colonne d'eau qui est

identique dans les deux cas. Cette hypothèse pose la limite d'aspiration des pompes des citerniers de Galilée équivalente à la limite de la chute de l'eau dans la colonne de Berti et de Magiotti. Dans ce contexte, le débat sur l'existence du vide se voit relancé et la doctrine scolastique de l'*horror vacui* largement remise en cause.

L'expérience barométrique

En 1644, Evangelista Torricelli reprend l'interprétation suggérée par Baliani : la limite d'aspiration de l'eau est bien à rechercher dans les effets du poids de l'air. Il adapte l'expérience de Berti en remplaçant l'eau par du mercure (vif-argent) de façon à obtenir une hauteur de liquide inférieure à 10 mètres. Selon lui, « pour deux liquides différents, les hauteurs sont dans le rapport des masses volumiques » (Torricelli 1644).



Afin d'éprouver ce qu'il sera désormais convenu d'appeler « l'hypothèse du poids de l'atmosphère » (Roux 2007, p. 6), Torricelli imagine l'expérience suivante : un tube de verre contenant du mercure est retourné sur un récipient lui-même rempli de mercure. Une partie du mercure contenu dans le tube s'écoule dans le récipient, laissant un espace vide en apparence en haut du tube de verre (espace que nous appellerons désormais « espace torricellien », voir ci-contre).

Pour Torricelli (comme pour Baliani; Berti ou Magiotti), la limite atteinte par la colonne de mercure dans le tube correspond à une situation d'équilibre entre le poids de cette colonne et le poids de l'air situé au-dessus de la surface du mercure du récipient :

On peut supposer que la force qui empêche le vif-argent de tomber en dépit de sa nature, a sa force à l'intérieur du vase, soit qu'elle provienne du vide, soit qu'elle ait pour cause quelque matière extrêmement raréfiée. Mais je prétends que cette force est extérieure et qu'elle vient du dehors. Sur la face du liquide contenu dans la cuvette, pèse une colonne d'air haute de 50 milles. Ce n'est donc point merveille si le vif-argent entre dans le tube de verre et s'y élève jusqu'à faire équilibre à la gravité de l'air extérieur qui le pousse. En un vase semblable mais beaucoup plus long, l'eau montera à peu près à 18 brasses ; elle s'élèvera plus haut que le vif-argent dans le rapport où celui-ci est plus lourd que l'eau afin de faire équilibre à la même cause qui pousse également l'eau et le vif-argent (Torricelli 1644, traduction P. Duhem, *Revue générale des sciences* 1906, p. 809).

Avec cette expérience, Torricelli établit donc un lien causal entre l'action de l'air et la suspension du mercure dans le tube. D'un raisonnement fondé sur un objet local, intrinsèque au dispositif (l'espace torricellien) dont il perçoit le caractère stérile, Torricelli passe à un objet extrinsèque : l'air atmosphérique. Autrement dit, ce qui retient le mercure n'est pas à rechercher dans une attraction qui aurait son origine dans le tube, mais au contraire à l'extérieur. Ce déplacement s'accompagne d'une nouvelle approche du dispositif dans laquelle le tube à mercure devient un instrument de mesure : un baromètre, capable de rendre compte de certaines propriétés de l'air, notamment son caractère pesant. L'explication proposée par Torricelli repose à nouveau sur une analogie entre l'eau et l'air. Pour lui, l'eau et l'air se comportent pareillement lorsque l'on y plonge des objets parce qu'ils possèdent, l'un comme l'autre, une masse non nulle :

Nous vivons immergés au fond d'un océan de l'élément air dont on sait, par des expériences indubitables, qu'il est pesant et qu'il est si dense à la surface de la Terre qu'il pèse à peu près le quatre-centième du poids de l'eau (...). (Torricelli 1644, *notre traduction*).

L'expérience « donnant à voir le vide » soulève, dans la communauté savante du 17^e siècle, deux questions : l'une relative à la nature de l'espace laissé libre au-dessus du mercure, l'autre relative à la suspension du mercure dans le tube. La réponse à ces deux questions opposent deux positions largement déterminées par l'attachement (ou non) des savants de l'époque à l'autorité de *l'horror vacui* : d'une part celle de la physique aristotélicienne, arguant que c'est l'horreur de la nature pour le vide qui maintient le mercure en suspension et que le sommet du tube est occupé par une matière indécélable mais effective⁷ ; d'autre part celle de la physique en voie de constitution, considérant que le sommet du tube ne peut être que vide et qu'une raison mécanique extérieure explique la suspension du mercure. De fait, l'expérience de Torricelli n'apporte pas la preuve de l'existence du vide mais l'interprétation que propose le savant italien donne au principe de causalité un sens novateur et à l'expérience un statut inédit dans ce qui apparaît comme l'un des premiers raisonnements hypothético-déductifs (Blanché 1969, 30-31 ; Roux 2007, p. 5). Vraisemblablement informé de l'expérience barométrique par le R.P. Marin Mersenne qui entretenait des liens étroits avec la communauté savante italienne (Taton 1963), Blaise Pascal souscrit à l'hypothèse du poids de l'air et affirme que le vide n'est pas une chose impossible dans la nature et « qu'elle ne le fuit pas avec tant d'horreur que plusieurs se l'imaginent » (Pascal 1647, p. 363).

Aucune des matières qui tombent sous nos sens, et dont nous avons connaissance, ne remplit cet espace vide en apparence. Mon sentiment sera, jusqu'à ce qu'on m'ait montré l'existence de quelle matière qui le remplisse, qu'il est véritablement vide, et destitué de toute matière (Ibid. p. 369).

Selon lui, la cause de la suspension du vif-argent dans le tube n'est pas à rechercher dans la contrainte imposée par la nature d'empêcher le vide de se former, il est par conséquent possible que l'espace torricellien soit exempt de toute matière, et l'unique façon de le prouver est de faire varier l'action de l'air autour du récipient rempli de vif-argent.

Blaise Pascal, Robert Boyle et la méthode des variations

Blaise Pascal crée un programme expérimental original fondé sur la méthode dite des « variations » (Massignat 1998). La question n'est plus ici de savoir si le vide existe, mais de mettre à l'épreuve l'hypothèse du poids de l'air en faisant varier les propriétés du milieu extérieur au dispositif barométrique. L'expérience du Puy de Dôme (1648), mais également celle du « vide dans le vide » réalisée par Boyle en 1660 s'inscrivent dans cette perspective.

7 Pour les détracteurs de l'existence du vide, la suspension du mercure est à rechercher dans l'horreur de la nature pour le vide : le mercure descend peu pour ne pas laisser le vide s'installer. Hobbes, Noël, Linus établissent ainsi un lien causal entre la matière contenue dans l'espace torricellien et la présence de la colonne de mercure dans le tube de verre, restreignant leur raisonnement au seul dispositif, sans prendre en compte le milieu extérieur dont ils admettent pourtant le caractère pesant. Linus explique par exemple que l'espace laissé libre au-dessus du mercure du tube contient une sorte d'air raréfié, le « funicule » dont la propriété est de retenir le mercure (Potter 2001, p. 298). La présence de cet air raréfié est expliquée par l'abbé Noël dans l'une de ses lettres à Blaise Pascal. Précisons tout d'abord que dans la tradition aristotélicienne et scolastique, ce que nous respirons (« l'air commun ») est un mélange de feu et d'air. Pour Noël, le verre est une matière poreuse, en ce sens qu'elle est susceptible de laisser passer certains corps, comme le ferait « un linge bien tissu » pour une eau boueuse. C'est cette capacité du verre à filtrer l'air commun qui explique la présence d'un corps dans l'espace laissé libre. Ainsi, lorsque le mercure du tube descend, il entraîne avec lui, par aspiration, l'air, qui se sépare alors de son mélange initial avec le feu, si bien que ne demeure à l'extérieur et dans les pores du verre que la matière grossière et pesante, tandis que l'espace libre du tube est rempli de matière « subtile » sans masse : « Si donc on me demande quel corps entre, le tube descendant, je dirai que c'est un air épuré qui entre par les petits pores du verre, contraint à cette séparation du grossier par la pesanteur du vif-argent descendant et tirant après soi l'air subtil qui emplissait les pores du verre, et celui-ci tiré par violence, traînant après soi le plus subtil qui lui est joint et congénère, jusqu'à remplir la partie abandonnée par le vif-argent ». (*Première lettre du P. Noël à Pascal*, p. 200).

Le projet que fit Pascal de l'expérience du Puy de Dôme nous est connu par sa lettre du 15 novembre 1647 qu'il écrivit à son beau-frère Florien Périer et qui débute par un rappel de son expérience du « vide dans le vide » (la lettre de Blaise Pascal à Florin Périer est en annexe de cette partie) :

Je ne saurai mieux vous témoigner la circonspection que j'apporte, avant que de m'éloigner des anciennes maximes, que je vous remette dans la mémoire l'expérience que je fis ces jours-ci avec deux tuyaux l'un dans l'autre, qui montre apparemment le vide dans le vide. Vous vîtes que le vif-argent du tuyau intérieur demeura suspendu à la hauteur où il se tient d'ordinaire, quand il était contrebalancé et pressé par la pesanteur de la masse extérieure de l'air et qu'au contraire, il tomba entièrement, sans qu'il lui restât aucune hauteur ni suspension, lorsque par le moyen du vide dont il fut environné, il ne fut plus du tout pressé ni contrebalancé d'aucun air, en ayant été destitué de tout côté.

Le principe de l'expérience du « vide dans le vide » peut être résumé comme suit :

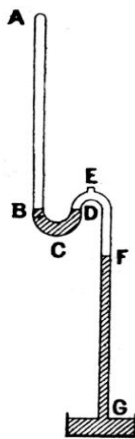


Fig. 1

Un tube de la forme indiquée par la figure 1, dont les parties AC et EG mesurent un peu plus de 76 cm contient dans la partie recourbée en S une ouverture E que l'on peut obstruer hermétiquement. Cette ouverture étant fermée, on remplit le tube entièrement de mercure par l'orifice G et on le retourne sur une cuve de mercure après avoir bouché l'orifice. Quand le doigt est retiré, le mercure se dispose comme l'indique la figure; les parties AB et DEF sont vides d'air. La hauteur FG mesure la pression atmosphérique. On débouche alors l'ouverture E; l'air pénètre entre les deux parties du mercure contenu dans le tube; le niveau B monte dans la partie supérieure et si la partie CE est assez large et contient suffisamment de mercure, elle constitue la cuve d'un baromètre dont le tube est AB. Le niveau F descend jusqu'en G.

Cet ingénieux dispositif montre nettement la relation qui lie la pression atmosphérique et l'ascension du mercure, puisque celle-ci apparaît avec celle-là, ou disparaît si la pression atmosphérique s'exerce à la fois sur la cuve et à l'intérieur du tube. C'est sur ce principe qu'est construite l'expérience du Puy de Dôme : si la hauteur de la colonne de mercure est fonction du poids de l'air, alors celui-ci étant plus faible à mesure que l'on s'élève, la hauteur de mercure baissera au sommet d'une montagne :

La grande expérience de l'équilibre des liqueurs est la plus démonstrative de toutes celles qui peuvent être faites sur ce sujet, en ce qu'elle fait voir l'équilibre de l'air avec le vif-argent (...). S'il arrive que la hauteur du vif-argent soit moindre au haut qu'au bas de la montagne, il s'ensuivra nécessairement que la pesanteur de l'air est la seule cause de cette suspension, et non pas l'horreur du vide, puisqu'il est certain qu'il y a beaucoup plus d'air qui pèse sur le pied de la montagne que non pas sur son sommet ; au lieu qu'on ne saurait pas dire que la nature abhorre le vide au pied de la montagne plus que sur son sommet. (Pascal 1647, p. 222)

Dans une lettre adressée à Pascal le 22 septembre 1648, Périer mène le récit de *la grande expérience de l'équilibre des liqueurs* (la lettre de Florin Périer à Blaise Pascal se trouve en annexe de cette partie). Le dispositif barométrique de Torricelli est élevé au sommet du Puy de Dôme, en Auvergne (France). Conformément aux prévisions formulées par Torricelli en 1644, puis par Pascal en 1648, la colonne de mercure diminue au cours de l'ascension (Pascal 1648, p.221-225). Pour Pascal, il ne fait aucun doute que la variation du poids de l'atmosphère (que Pascal nomme « pesanteur de la masse de l'air ») est la cause de la variation de la colonne de mercure dans le tube. Cependant, l'interprétation qu'il expose dans son *Traité sur l'équilibre des liqueurs* ne clôt pas la controverse autour de l'existence du vide (Berthelot 2002) et l'hypothèse de la pesanteur de l'atmosphère se voit rejetée par des savants tels que l'abbé Noël, Hobbes ou encore Linus, persuadé que l'air n'est pas assez lourd pour contrebalancer le poids d'une colonne de 76 cm de mercure.

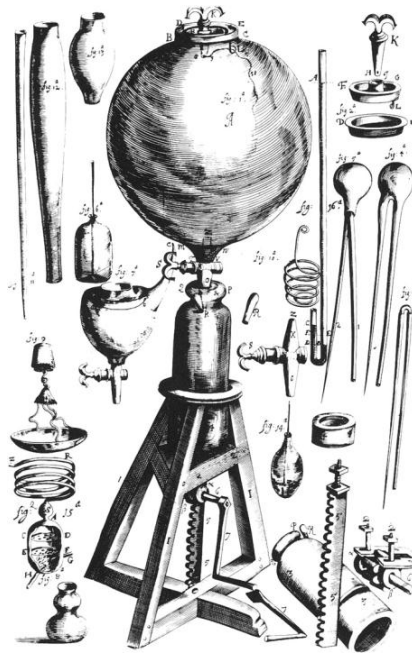


Figure 3 : La première « pompe à air » de Boyle. Figure extraite de Shapin & Schaffer, 1993, cahier central.

Douze ans après l'expérience du Puy de Dôme, le physicien anglais Robert Boyle publie son ouvrage *New experiments physico-mechanical touching the spring of the air* (1660) dans lequel il présente une machine capable de purger l'air d'un récipient clos. Cette machine est constituée de deux parties principales : un globe de verre renfermant l'air atmosphérique à évacuer et un dispositif de pompage (un piston actionné de haut en bas, voir Figure 3). Cette pompe avait pour but essentiel la réalisation de l'expérience du « vide dans le vide » qui devait donner une analogie visible des conditions de l'expérience du Puy de Dôme si celle-ci était réalisée au-delà de l'atmosphère.

Le dispositif barométrique de Torricelli est introduit dans le globe de verre. A ce moment de l'expérience, le mercure du tube reste au même niveau que lorsqu'il se trouve à l'air libre. Cela signifie que l'action de l'air dans le globe sur le mercure ne se réduit pas à son poids (dans le globe celui-ci est inférieur). A l'effet du poids de l'air s'ajoute une action dynamique dans toutes les directions que Boyle appelle « ressort » de l'air (Boyle 1660). Ensuite, lorsque le pompage commence, le niveau du mercure contenu dans le tube diminue jusqu'à atteindre un niveau très proche de celui du mercure de la cuve. La contribution de Boyle vient confirmer l'hypothèse de l'action de l'air atmosphérique et complète de manière ingénieuse la conception de Blaise Pascal concernant la pression. Quelques années plus tard, c'est un raisonnement fondé sur l'analogie entre l'air et l'eau qui conduit Edme Mariotte à réaffirmer l'hypothèse de la pression atmosphérique. Dans son *Discours sur la nature de l'air*, il suggère de plonger le dispositif barométrique de Torricelli dans l'eau à différentes profondeurs (Mariotte 1676, p. 150). Les variations de la colonne de mercure consécutives à cette immersion confirment les effets de l'action de l'air puisqu'elles sont de même nature que celles constatées par Pascal et Boyle dans l'air.

Historiquement, la genèse du concept de pression atmosphérique procède de l'étude des propriétés de l'air et, plus particulièrement, de la mise en évidence de son caractère pesant. Malgré tout, même si tous les savants du 17^e siècle admettent que l'air a une masse, certains d'entre eux ne voient pas dans cette propriété la cause de la suspension du mercure dans le tube. Pour ces derniers, le mercure contenu dans le tube de verre est retenu par une matière invisible située dans l'espace torricellien. La méthode des variations initiée par Pascal et utilisée par Boyle finira par mettre un terme à la polémique suscitée par l'interprétation de l'expérience barométrique et permettra, dès la fin du 17^e siècle, avec les travaux de Mariotte, d'amorcer une construction macroscopique complète

du concept de « pression » (Shapin & Schaffer 1993). Celle-ci se verra complétée par une première approche microscopique au milieu du 18^e siècle grâce, notamment, aux travaux de Bernoulli (Bernoulli 1738). C'est cette approche qui permettra de concilier l'idée d'isotropie (la pression dans un fluide s'exerce en un point de ce fluide dans toutes les directions) avec l'idée que la valeur de cette pression dépend directement du « poids » de la colonne située au-dessus de ce point, autrement dit, de concilier ce qui pourrait paraître comme une action verticale et vers le bas (le « poids » de la colonne de fluide) avec une action en point du fluide, dans toutes les directions, conciliation qui apparaît comme un obstacle didactique majeur.

Bibliographie

- Aristote. *Physique*, trad. P. Pellegrin (1999). Paris : Flammarion.
- Baliani J.B. (1630). Letter to Galileo, 27 July 1630, *Opere di Galileo*, XIV, p. 125.
- Bernoulli D. (1738). *Hydrodynamique*, trad. J. Peyroux (2004). Paris: Blanchard.
- Berthelot J.M. (2002). Pour un programme sociologique non réductionniste en étude des sciences. *Revue européenne des sciences sociales*, XL, 124, 233-252.
- Blanché R. (1969). *La Méthode expérimentale et la philosophie de la physique*, Paris : Colin,
- Boyle R. (1660). *New experiments physico-mechanical touching the spring of the air and its effects*. Londres.
- Canguilhem G. (1990). *Études d'histoire et de philosophie des sciences concernant les vivants et la vie* (1968) 7e réed. Paris : Vrin.
- Koyré A. (1966). *Études d'histoire de la pensée scientifique*, Paris : Gallimard.
- Galilée G. (1638). *Discours concernant les deux sciences nouvelles*. Trad. M. Clavelin (1970). Paris : A. Colin.
- Héron d'Alexandrie. *Les Pneumatiques*, trad. J.Y. Guillaumin & G. Argoud (1997), Presses Universitaires de Saint Etienne.
- Mariotte E. (1676). Discours de la nature de l'air, *Œuvres de M. Mariotte, de l'Académie Royale des sciences*, Tome I (1717), Pierre Vander (éd.) : Leyde, 149-182.
- Massignat C. (1998). *Vide et matière dans la première moitié du XVIIe siècle : phénoménologie d'une polémique décisive*. Thèse de doctorat, Université de Nantes.
- Pascal (1647). Expériences nouvelles touchant le vide. *Œuvres complètes* (1963). Paris : Seuil.
- Pascal B (1663b). Traité de la pesanteur de la masse de l'air. *Œuvres complètes* (1963). Paris : Seuil.
- Pascal B. (1648 and 1663). *The Physical Treatises*. New York: Columbia University Press, 1937.
- Pascal B. (1648). Récit de la grande expérience de l'équilibre des liqueurs. *Œuvres complètes* (1963). Paris : Seuil.
- Pascal B. (1663a). Traité de l'équilibre des liqueurs. *Œuvres complètes* (1963). Paris : Seuil.
- Potter E. (2001). *Gender and Boyle's Law of Gases*. Bloomington: Indiana University Press.
- Roux S. (2007). Deux exemples de raisonnements hypothético-déductifs : l'hypothèse de la pesanteur de l'air chez Torricelli et Pascal. *Cours d'épistémologie des sciences physiques*. Université Grenoble II disponible sur : http://disoama.free.fr/L1_05_ep_5.pdf (vérifié le 8 juillet 2011).
- Sadoun-Goupil M. (1963). L'œuvre de Pascal et la physique moderne, *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, vol. 16, 23-52.
- Séris J.P. (1994). *La Technique*, Paris : PUF.
- Shapin S. & Schaffer S. (1993). *Léviathan et la pompe à air*. Paris : La découverte.
- Taton R. (1963). *L'histoire générale des sciences*, Paris : PUF.
- Torricelli E. (1644). Letter to Michelangelo Ricci concerning the barometer, *Collected Works*, vol. 3 (1919). New York.